



## ブラックホールの質量【3：最終回】

## 超巨大ブラックホール（後半）

福江 純（大阪教育大学）

宇宙のはるか彼方にある天体の重さ（質量）はどうやって測るのだろうか？究極の天体ブラックホールを取り上げて、天体の重さの測り方を紹介したい。

ブラックホールは遠くにあるので直接調べることができないし、仮にできたとしても、重すぎて秤に乗せることができないだろう。逆に、ブラックホールが重いという性質を利用することによって、ブラックホールの重さを求めることができる。またブラックホール周辺から放射される光の性質を分析するなど、いろいろな工夫によって、ブラックホールの質量を求めたり推測したりすることが可能だ。

前回は、主に恒星の運動から超巨大ブラックホールの質量を求める方法について紹介した。今回は超巨大ブラックホールの周りに形成されるガス円盤の運動や光度など、様々な方法を用いた超巨大ブラックホールの質量の求め方について紹介し、この連載を終えることにする。

## 5. 回転ガス円盤の運動による方法

1990年代に入ると、銀河系中心でもそうだったが、観測技術の進展によって、活動銀河中心の超巨大ブラックホールについても確実な証拠がつぎつぎと得られるようになった。そしてまた、超巨大ブラックホールのまわりを回転するガスの回転運動も観測され始めたのだ。

## 5.1. 巨大橿円銀河 M87 の回転ガス円盤

すでに述べたように、巨大橿円銀河 M87 (NGC4486) の中心に、太陽の30億倍程度の超巨大ブラックホールが存在しているらしいことは、恒星分布の異常集中からすでに推測されていた。1990年代前半、ハッブル宇宙望遠鏡の観測チームは、この M87 銀河の中心部を詳細に観測し、プラズマガスの円盤と、その円盤の回転運動を検出したのである（図 15, 図 16 ; Ford 他 1994 年、Harms 他 1994 年）[10][11]。

まず、ジョン・ホプキンス大学と宇宙望遠鏡研究所のフォードたちは、サービスミッションによって新しく取り替えられたハッブル宇宙望遠鏡の広視野惑星カメラ 2 WFPC2 (Wide Field Planetary Camera 2) で狭帯域の画像を得た（図 15; Ford 他 1994 年）[10]。

図 15 は、水素の H $\alpha$  輝線近傍だけの光で撮像した M87 銀河中心近傍の画像で、中心に集中する無数の星の光は大部分がカットされ、主に電離した水素ガスが写っていると考えてい。図の右上には中心から吹き出すジェットがくっきりと写っており、左上の拡大画像にはガス円盤が浮き彫りになった。ジェットの存在は知られていたが、活動銀河中心核に

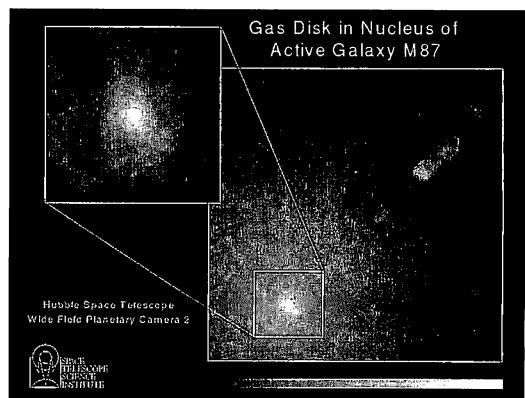


図 15 ハッブル宇宙望遠鏡で撮像した巨大橿円銀河 M87／NGC4486 中心部の回転ガス円盤 (NASA/STScI) [10]。電離水素ガスの放射する光で観測すると、ジェットとガス円盤が浮き彫りになった。

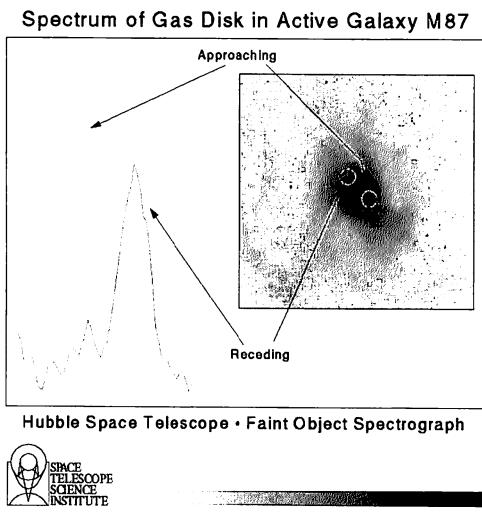


図 16 巨大楕円銀河 M87／NGC4486 中心部の回転ガス円盤 (NASA/STScI) [11]。円盤上の 2 カ所からやってくる光が、回転運動に伴うドップラー効果によって、波長が偏移している。

におけるガス円盤の検出は、M87 銀河だけでなく他の場合も含めて、この観測が初めてである。

ガス円盤は渦状構造をしており、円盤ガスが中心に向けて吸い込まれているように見える。また円盤は少し潰れて見えていて、もし本来の円盤が真円に近い形をしているなら、円盤の真上方向に対して 42° の方向から円盤を見ていることになる。さらにジェットは、円盤の見かけの短軸方向から約 20° の方向に位置しているが、傾きによる射影効果を考慮すると、ジェットは円盤面から垂直に吹き出していると考えて差し支えない。たった一枚の画像からさまざまなことがわかつってきた。

さらに同じ観測ミッションで、応用研究所のハームズたちは、ハッブル宇宙望遠鏡搭載の微光天体分光器 FOS (Faint Object Spectrograph) を用い、ガス円盤上の 2 カ所の光を分光観測した (図 16; Harms 他 1994 年) [11]。すなわち、円盤の中心を通って、

ジェットの方向に垂直な方向の線上で、中心からの角距離 (角度で表した見かけの距離) が、それぞれ、

0.25 秒角

の 2 カ所から来る光を分光観測すると、片側のガスは見かけの視線速度が、

$500 \pm 50 \text{ km/s}$

で近づいてきており、もう片側は同じ速度で遠ざかっていることがわかったのだ。ガスの落下運動や噴出運動という可能性も皆無ではないが、ジェットとの位置関係などから、この速度は円盤ガスの回転運動に伴うものだと解釈するのがもっとも自然である。

以上が基本的な観測事実で、後は、その単純な解析である。まず、M87 銀河までの距離は、約 5000 万光年 (15.3 Mpc) なので、角度で 0.25 秒角ということは、中心からの実距離は、

60 光年

に相当する。さらに円盤を真上から 42° 傾いた方向から観測していることを考慮すると、視線速度が 500 km/s ということは、円盤ガスの実際の回転速度が、

750 km/s

であることを意味する。これら二つの量から中心の質量を見積ることは簡単で、

24 億  $\pm$  7 億 太陽質量

という値が得られた。

この値は、20 年も前の恒星分布異常から見積もられた値と同じぐらいなので、一見、新味がなさそうだが、むしろ逆で、この場合は、同じ値が出たことが非常に重要なのだ。すなわち、恒星分布異常と回転ガス円盤というまったく独立な観測によって、ほぼ同じ値が出てきたことは、中心の“光で見えない”天体の質量、すなわち超巨大ブラックホールの存在がますます確実になったことを意味しているのである。また恒星分布による推定はモデルへの依存性もあって信頼性が十分でなかつただけに、回転ガス円盤の観測は、超巨大ブラックホールの存在に対して、非常に強力な

証拠になったのである。

ガス運動の解析によって、十数個もの銀河の中心で超巨大ブラックホールの質量が推定されている[8][9]。

■問 4 M87 銀河の観測量の解析をトレースし、ケプラーの法則を当てはめて、超巨大ブラックホールの質量を求めよ。

### 5.2. メガメーザーM106 の回転ガス円盤

また 1990 年代中頃に注目を浴びたのが、M106 と呼ばれる銀河中心における回転ガス円盤の発見と、それから推定された M106 中心の超巨大ブラックホールの存在である（三好他 1995 年）[12]。

銀河 M106 (NGC4258) は、Sbc 型の渦状銀河で、若干の活動性は示すものの、たいして激しく活動していない目立たないタイプの活動銀河で、「低光度活動銀河核 LLAGN

(low-luminosity active galactic nuclei)」の一種だ（図 17）。ところが、水分子のメーザー放射（電波領域で起こるレーザー放射の一種）が非常に強いことがわかり、現在では、「メガメーザー (megamaser)」などと呼ばれることもある。

この M106 銀河は、可視光の写真（図 17）ではただの渦状銀河に見えるが、水素の H $\alpha$  輝線やシンクロトロン放射や X 線などで見ると、通常の渦状腕以外に、もう一对の腕が存在するのだ（図 18）。この異常な腕は、M106 銀河の中心から銀河円盤内に放出されたジェットが銀河面内のガスと相互作用してできたものではないかと想像されている。

国立天文台の三好らは、アメリカ国立電波天文台の超長基線電波望遠鏡 VLBA (Very Long Baseline Array) を用いて、M106 銀河中心部から放射される水分子のメーザー放射を観測した。そして、中心を挟む左右方向で、

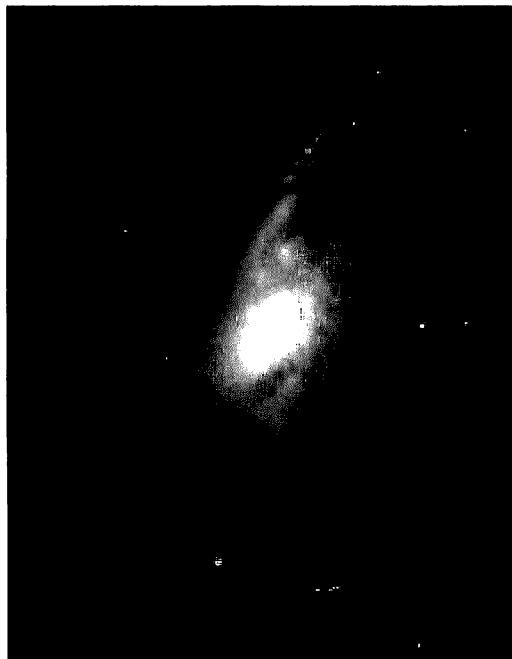


図 17 メガメーザーM106／NGC4258（大阪教育大学）。

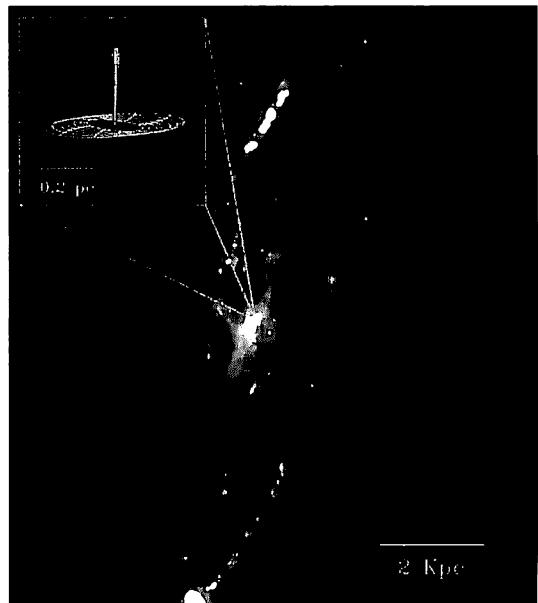


図 18 水素の H $\alpha$  輝線で撮像したメガメーザー M106／NGC4258 (<http://www.nrao.edu/imagegallery/php> ; NRAO/AUI and Gerald Cecil and Holland Ford)。

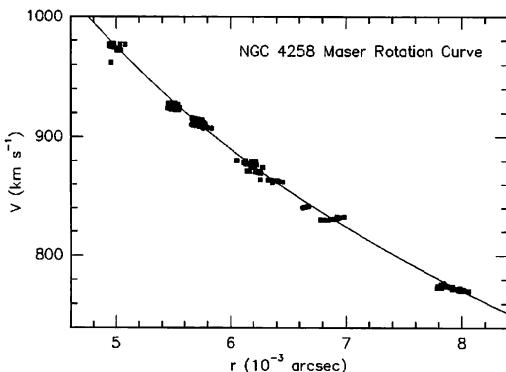


図 19 水メーザー輝線のドップラー偏移から得られたメガメーザーM106 の回転ガス円盤の回転曲線[12]。

銀河中心からの 0.005 秒角から 0.008 秒角という非常に中心近傍からやってくるメーザー放射の観測に成功し、さらにそれらの放射が系統的にドップラー偏移していることを検出したのである（図 19）。すなわち、M106 銀河の中心に近いほど、水メーザー輝線の偏移は大きく、したがって対応する回転速度も大きいことがわかったのだ。

具体的な回転速度の曲線は、実測される見かけの角距離を単位にすると、

$$V(r) = 2180(r/0''.001)^{-1/2} \text{ km/s}$$

のようになり、M106 銀河までの距離（約 2500 万光年）を用いて、実距離に変換すると、

$$V(r) = (832 \pm 2)[r/(0.25\text{pc})]^{-1/2} \text{ km/s}$$

のようになる。この関係から、M106 銀河中心の超巨大ブラックホールの質量を求めるこことは簡単で、

3600 万太陽質量

という値になった。なお、その後の追観測などで、より精度が上がったものとして、

3900 万±100 万太陽質量

という値が得られている。

巨大楕円銀河 M87 の場合は、ガス円盤上の 2 力所だけの観測であり、回転運動は仮定するしかなかったのだが、メガメーザー M106 では、何カ所もの観測点が得られて、それらがきれいなケプラー回転曲線に乗ったことから、質量源が点状であること、すなわちブラックホールである信憑性がますます高まったのである。

以上までに例として述べてきた超巨大ブラックホールの質量について、表 2 にまとめておく[8][9]。

■問 5 M106 について、得られた関係式にケプラーの法則を適用して、中心の超巨大ブラックホールの質量を求めよ。

表 2 超巨大ブラックホールの一覧表。文献[8]、[9]にもとづいて作成した。  
ブラックホールの質量は、誤差もあるので、だいたいの目安である。

名 称	銀河の種類	距離 [Mpc]	質量 [太陽質量]
銀河系中心いて座 A*	Sbc	0.0085(2 万 8000 光年)	370 万
アンドロメダ銀河 M31	Sb	0.7 (230 万光年)	3000 万
アンドロメダ伴銀河 M32	E	0.7 (230 万光年)	200 万
レンズ状銀河 NGC3115	S0	8.4 (2700 万光年)	10 億
ソンブレロ銀河 NGC4594	Sa	9.2 (2900 万光年)	5 億
楕円銀河 NGC3377	E	9.9 (3200 万光年)	8000 万
巨大楕円銀河 M87	cD	15.3 (5000 万光年)	30 億
M106/NGC4258	Sbc	7.5 (2500 万光年)	3900 万

## 6. 降着円盤の光度とスペクトルによる方法

ここまで述べてきたような、星の運動やガスの運動を検出してケプラーの法則を適用する方法、いわゆる力学的な方法は、連星系の場合でも使われていたが、信頼性も正確度も高い。しかし、中心からの距離と速度の情報が必要なので、中心からの距離が測定できる比較的近くの銀河しか使えない。中心部分の分解できない遠方の銀河でも使える方法としては、より間接的な方法だが、超巨大ブラックホール周辺の光輝くプラズマガスー通常は降着円盤を念頭に置くーの放射光度とスペクトルが利用してきた[13]。

### 6.1. エディントン光度

まず、超巨大ブラックホールの重さの下限しか得られないが、天体の上限光度であるエディントン光度を用いる方法がある。

ブラックホール周辺のガス（降着円盤）が光り輝くのは、ブラックホールの重力勾配の中をガスが渦巻きながら落下するときに、ガスがもっていた位置エネルギーがガス同士の摩擦を通して放射エネルギーに変換されたためだ。このとき放射されるガス円盤の全光度は、一般的には、重力の落差を作るブラックホールの質量と降ってくるガスの割合（質量降着率）の積に比例する。

ところで、仮にブラックホールの質量を固定したまま、降ってくるガスの割合を増やしていくと、最初のうちはガスの割合に比例して光度が大きくなっていくが、ガスの割合が臨界値を超えると光度は頭打ちになることがわかっている（図 20）。

光度が頭打ちになる理由は、ある質量に対して、降ってくるガスの量があまりに多くなりすぎると、光度が大きくなりすぎて放射圧によってガスが吹き飛ばされたり、あるいは逆に、落下してくる多量のガスに放射が閉じ込められ、そのままブラックホールに吸い込

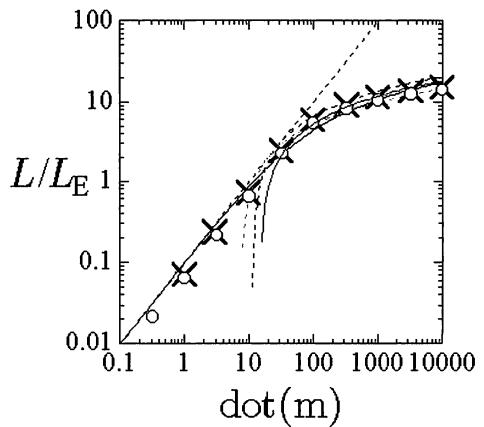


図 20 降着円盤の光度と質量降着率の関係。横軸が臨界質量降着率を単位として測った質量降着率で、縦軸はエディントン光度を単位として測った円盤の光度である。臨界質量降着率以下では円盤光度は質量降着率に比例するが、臨界質量降着率を超えると頭打ちになる。

まれて、外部へは出てこれなくなったりするからだ。

この頭打ちになる光度が、その質量のブラックホール周辺のガスが放射できる上限光度で、「エディントン光度（Eddington luminosity）」と呼ばれている[13]。ブラックホールの質量が変わればエディントン光度も変わるが、そもそもブラックホールの位置エネルギーはブラックホールの質量に比例するので、エディントン光度もブラックホールの質量に比例する。具体的には、1 億太陽質量を単位として測った超巨大ブラックホールの質量を  $M_8$  と置けば、エディントン光度  $L_E$  は、

$$\begin{aligned} L_E &= 1.25 \times 10^{39} M_8 \text{ W} \\ &= 3.25 \text{ 兆 } M_8 \text{ 太陽光度} \end{aligned}$$

となる。

そこで、活動銀河中心が十分に明るいケースで、ブラックホール周辺の光度がすでにエ

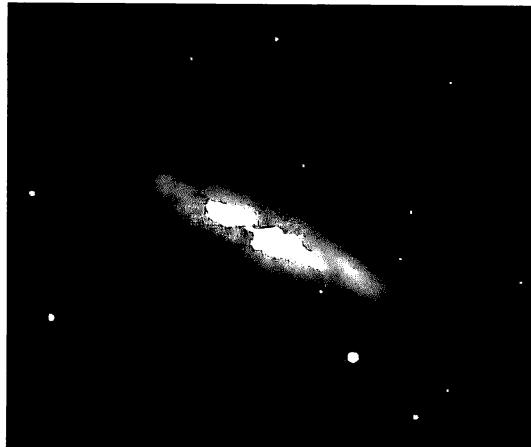


図 21 スターバースト銀河 M82／NGC3034(大阪教育大学)。

ディントン光度に達していると仮定できる場合には、上の関係を逆に利用して、超巨大ブラックホールの質量を推定できるわけである。そして実際、多くの明るい活動銀河中心核に対して、この方法でブラックホールの質量を推測している。ただし、実際にはエディントン光度に達していないかも知ないので、この方法で得られる推定値は、ブラックホールの重さの下限である。

たとえば、スローンデジタルスカイサーベイによって、超遠方のとてつもなく明るいクエーサーSDSS 1044-0125 が発見された[14]。このクエーサーの赤方偏移は 5.8 もあり、宇宙が誕生してからほんの 10 億年程度しか経過していない時代の天体だ。にもかかわらず、非常に明るく輝いていて、光度は  $4.8 \times 10^{40}$  W もあり、何と太陽の 100 兆倍、ふつうの銀河の 1000 倍も明るい。もしエディントン光度で輝いたとしたら、太陽の 34 億倍の質量をもった超巨大ブラックホールが必要になる。

この方法で得られた有名な例としては、活動銀河の中心核ではないが、「超光度 X 線源 ULX (ultra luminous X-ray source)」として発見されて、「中間質量ブラックホール

(intermediate mass black hole)」として知られるようになった、M82 X-1 がある。2000 年、マサチューセッツ工科大学（当時）の松本浩典らを中心とした日本人グループが、チャンドラ X 線衛星を使った X 線観測によって、スターバースト銀河 M82 の中心付近に、恒星ブラックホールと超大質量ブラックホールの中間的な質量のブラックホールを発見した（松本他 2001 年）[15]。

中間質量ブラックホールが発見された銀河 M82 (NGC3034) は、おおぐま座の方向で距離約 1200 万光年にある不規則銀河で、爆発的に星形成が起こっている「スターバースト銀河 (starburst galaxy)」として知られている（図 21）。

この M82 銀河の中心領域をチャンドラ X 線衛星で撮像したところ、いくつかの X 線源が発見された（図 22）。小さい X 線源はおそらくは星の死によって生じたタイプのブラックホールだが、注目すべきは画像右方の明るい X 線源である。この明るい X 線源が、こんにち M82 X-1 と呼ばれる天体だ。M82 銀河の力学的中心からは、角度で 9 秒角、実距離にして 170pc (550 光年) 離れている。

この X 線源の明るさの時間変動などから考えると、この明るい X 線源もまず間違いなくブラックホールである。しかし、X 線の明るさが他の X 線源に比べて異常に明るいことが画像からも見て取れるだろう。実際、観測される X 線強度と M82 銀河までの距離から、X 線が球対称に放射されていると仮定して X 線の光度を計算すると、

$$10^{34} \text{ W}$$

にもなる。そして、もし M82 X-1 がエディントン光度で輝いているとしたらブラックホールの質量は、

$$800 \text{ 太陽質量}$$

程度になるのである。この値は、普通のブラックホールの質量よりはかなり大きいが、

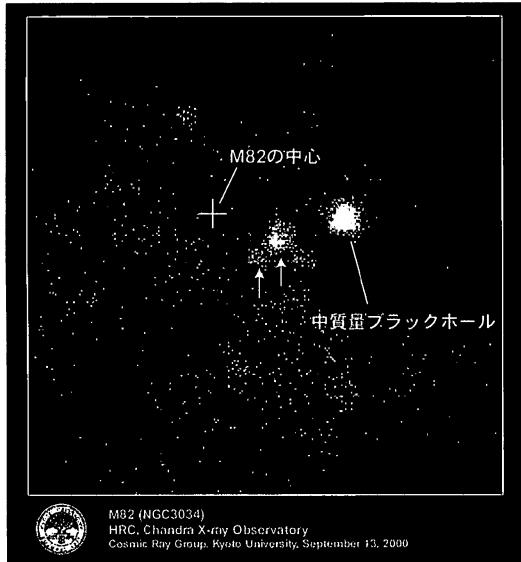


図22 スターバースト銀河 M82 の中心領域の X 線画像 (<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/xray/press200010/>) [15]。小さい X 線源は普通のブラックホール、大きな X 線源は新しく見つかった中間質量のブラックホール。M87 銀河の中心 (+印) と中間質量ブラックホールの距離は約 500 光年。

M87 銀河の中心などに存在する超巨大ブラックホールほどの質量はない。そこで、従来知られていた恒星ブラックホールと超巨大ブラックホールの中間程度の質量をもつという意味で、「中間質量ブラックホール」と呼ばれるようになったのだ。この中間質量ブラックホールの質量は、太陽の 1000 倍から 1 万倍と見積もられている。

■問 6■ エディントン光度の方法を用いて、M82 X-1 のブラックホールの質量を求めてみよ。

## 6.2. 連続スペクトルの盛り上がり形状

降着円盤から放射されるスペクトルの性質は、比較的よくわかっている[13]。すなわち、

降着円盤から放射される電磁波のスペクトルは、活動銀河中心核の場合、非常に大ざっぱに言えば、約 10 万度の温度のガスから放射される黒体輻射のスペクトルに近いものである。ただし、温度などは中心のブラックホールの質量と関連しているので、それを利用してブラックホールの質量を推測することもなされた。

クエーサーなど活動銀河のスペクトルは、全体としてはべき乗型スペクトルと呼ばれるものでよく表されるが、局所的には、しばしば紫外線の領域で膨らみがあることが知られており、「紫外超過」とか「3000 Å のバンブ（こぶ）」と呼ばれていた。この部分が降着円盤の連続放射スペクトルでよく説明できることを、1980 年代に、カリフォルニア工科大学のマルカンが指摘した(Malkan 1983 年)[16]。そしてマルカンは、いろいろなクエーサーに対して、1 億から数十億太陽質量の値を推測している。

## 6.3. 輝線スペクトルの二重ピーク形状

降着円盤から放射されるのは、連続的な電磁波成分だけではない。水素の輝線や鉄の輝線など、いわゆる線スペクトルも放射される場合がある。そしてそれらの線スペクトルは、降着円盤の回転運動と相対論的な効果のために、しばしば非対称な二重のピークプロファイルをもつことが想像されている[13]。

実際、いくつかの活動銀河のスペクトルでは、水素の H $\alpha$  輝線や鉄輝線なので、非対称な二重ピークスペクトルが発見された。

たとえば、水素 H $\alpha$  輝線の二重ピークプロファイルとしては、楕円銀河 Arp 102B があり[17]、鉄輝線の二重ピークプロファイルとしては、MCG-6-30-15 などがある[18]（図 23）。

輝線の放射率などモデル依存性も大きいが、これらの輝線スペクトルの形状からも、ブラ

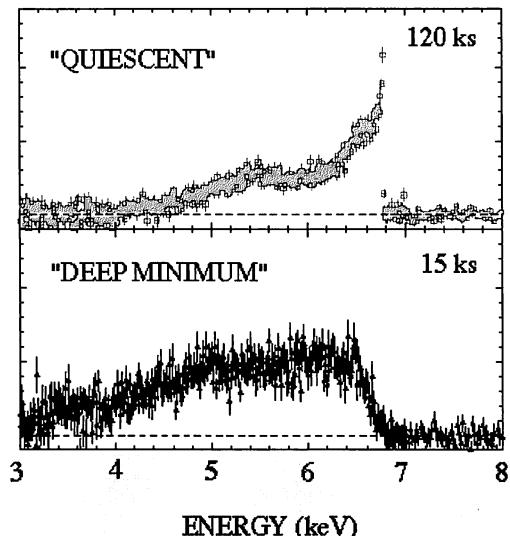


図 23 MCG-6-30-15 銀河で観測された鉄輝線の例 ([http://heawww.gsfc.nasa.gov/~nandra/htxs/htxs\\_pres.html](http://heawww.gsfc.nasa.gov/~nandra/htxs/htxs_pres.html))。横軸はキロ電子ボルトを単位とするエネルギーで、縦軸は X 線の強さである。時期によってプロファイルは変化する。

クホールの質量を推測することが可能である。

## 7. 反響図法

やはり超巨大ブラックホール周辺のガスや降着円盤を利用するものだが、光のエコー効果にもとづく「反響図法 (reverberation mapping)」と名付けられた方法もある (Blandford and McKee 1982 年) [19]。この手法は、マッピングとついていることからも想像できるように、本来は、中心核から発した光が周辺の雲に反射される様子を調べて、周辺の雲の模様を再現しようとするものだ。

活動銀河の中心核には、超巨大ブラックホールと光り輝く降着円盤があるだけではない。その周辺には無数のガス雲が飛び回っていると想像されている（図 24）。それらのガス雲

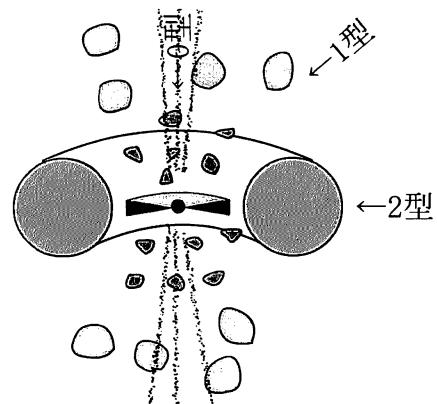


図 24 活動銀河の中心領域（図 1 も参照）。超巨大ブラックホールと降着円盤の周辺には、無数のガス雲が飛び回っている。

は、中心核（降着円盤）からの高エネルギー放射を受けて電離し、その結果、輝線を放出している。ガス雲から放出される輝線は、ガス雲の高速運動に伴うドップラー効果によって、さまざまに波長がずれ、最終的には、クエーサーやセイファート銀河などで観測される、幅が広くて強い輝線を作っているのだと考えられている。幅が広い輝線を作るので、このガス雲の領域は、「広輝線領域 BLR (broad line region)」と呼ばれている。

さて、降着円盤の明るさは常に一定というわけではなく、しばしば変化している。そして降着円盤の明るさが変化すれば、それに伴って、ガス雲の電離や輝線放出も影響を受けることになる。しかも、ガス雲の領域 BLR は、ブラックホールと降着円盤からは少し距離があるので、降着円盤からガス雲まで光が届くのに要する時間の分だけ、ガス雲の変化には若干の遅れが生じることになる。降着円盤からは連続光が、ガス雲からは輝線が出てくるので、観測によって、どちらから出てきた光かはきちんと区別ができる。実際、観測的にも、連続光（降着円盤）が明るくなつて、

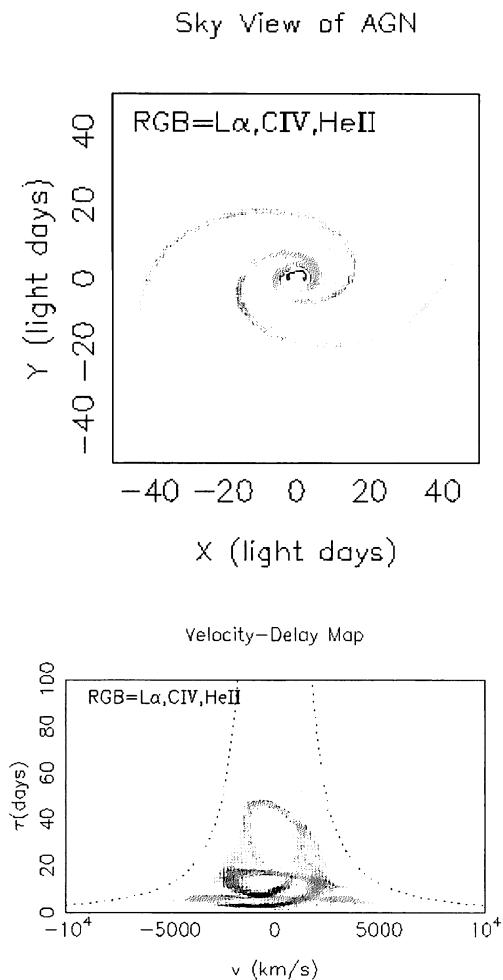


図 25 反響図法のシミュレーション (<http://mensa.ast.uct.ac.za/AT/cmap2b2.gif>)。

典型的には、数日から数百日後に、輝線（ガス雲）に変動が見られる。

これがまさに、降着円盤の光をガス雲がエコー（こだま）したものだ。そして、その反響パターンを上手に解析することで、周辺を飛び回る雲の模様を再現できるのである。その手法が「反響図法」と呼ばれている。

たとえば、図 25 はシミュレーションだが、無数のガス雲が図 25 上のような渦状パターンで分布しているときに、輝線の幅から得ら

れるガス雲の速度分布と反応時間の遅れが図 25 下のようになることを表している。すなわち、観測から下の図のようなデータ（あるいは違う反応）が得られたなら、それを逆に解いて、雲の模様は上の図のような（あるいは違う模様）ものであることがわかるのだ。

反響図法の手法では、超巨大ブラックホールの質量  $M$  は、

$$M = f c \tau \Delta V^2 / G$$

で見積もられる。ただしここで、 $f$  は 1 程度の因子、 $c$  は光速、 $\tau$  は輝線の応答時間の遅れ ( $c\tau$  でガス雲の領域のサイズになる)、 $\Delta V$  は輝線の幅（ガス雲の運動速度を表す）、そして  $G$  は万有引力定数である。

現在はまだ反響図法で求めた超巨大ブラックホールの質量推定値には、数十%程度の曖昧さが残るが、精密化が進められている。とくに、銀河中心部が分解できない遠方の銀河では力学的な手法が使えないのに、超巨大ブラックホールの質量を求めるためには、反響図法の有用性がますます高くなるだろう。

## 8. マゴリアン関係

さまざまな銀河の中心で超巨大ブラックホールの質量が見積もられるようになると、統計的な議論が可能になってくる。この 10 年ぐらいで集中的に議論されたのが、ブラックホールの質量と銀河のバルジ（核恒星系）の物理量との間の相関である。バルジが明るかったり速度分散が大きかったりするなど、バルジの規模が大きいほど、中心の超巨大ブラックホールの質量が大きいという関係があるので。一言で言えば、銀河のバルジの質量が大きいほど、中心の超巨大ブラックホールの質量も大きいのである。

この相関関係はかなり前から予想されていて、1995 年の総合報告でも整理されているが（Kormendy and Richstone 1995 年）[8]、その後、より精密化して再評価した論文

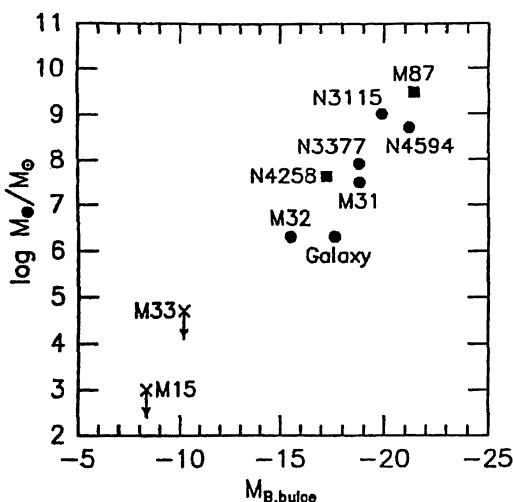


図 26 バルジの絶対等級（横軸）とブラックホール質量（縦軸）の関係 [8]。1995 年当時の少ないデータでさえ、バルジが明るいほどブラックホールの質量が大きいという相関が見て取れる。

(Magorrian 他 1998 年) [20]にちなんで、現在では、“マゴリアン関係”と呼ばれることも多い。

たとえば、図 26 は、バルジの絶対等級と超巨大ブラックホールの質量の相関をしたものだ。図の横軸が B バンドでのバルジの絶対等級で、縦軸が太陽質量を単位としたブラックホール質量の対数値である[8]。1995 年当時の少ないデータでさえ、バルジの絶対等級が小さい（明るい）ほど中心の超巨大ブラックホールの質量が大きいという、正の相関が見て取れるだろう。横軸を、バルジの星の速度分散にしても、同じような相関図が得られる。

マゴリアン関係による相関関係式は、超巨大ブラックホールの質量を  $M$ 、バルジの星の速度分散を  $\sigma$  とすると、だいたい、

$$M = 1 \text{ 億太陽質量} (\sigma / 200 \text{ km/s})^4$$

くらいになる。ただし、係数（1 億から 1 億 5 千万ぐらい）や指数（3.5 から 4.5 ぐらい）

はデータの種類や解析によってバラツキがある。しかし、このような関係が成り立つのなら、銀河のバルジの明るさや速度分散を観測するだけで、中心に存在する超巨大ブラックホールの質量をだいたい見積もることが可能になるのだ。

また、これも人によってバラツキがあるが、超巨大ブラックホールとバルジの質量比は、  
ブラックホール質量／バルジ質量  $\sim 0.001$  程度になりそうだ。

## 9. ブラックホールシャドウ

最後に最近の面白い研究として、「ブラックホールシャドウ (black hole shadow)」について触れておきたい。

ぼく自身、かつて、ブラックホールのまわりの相対論的な降着円盤がどのように見えるか、いわば降着円盤という光る衣を纏ったブラックホールのシルエットについて計算したことがある[21]。そして、そのネタは、もうホント、あちこちで使ってきた。

しかしドイツのマックスプランク研究所のファルケたちによる最近の研究で、降着円盤でなくとも、ブラックホールが光るプラズマガスに覆われていれば、そしてそのプラズマガスが半透明であれば、明るいプラズマガスを通して、“ブラックホールの影”が見える可能性があることがわかった (Falcke 他 2000 年) [22]。彼らは、いわば、光る薄絹を纏ったブラックホールのシルエットを調べたのである（図 27）。

しかも、ブラックホールの大きさ（質量）が大きければ大きいほど、影のサイズも大きい。したがって、ブラックホールシャドウが観測できて、そのサイズが測れれば、ブラックホールの重さが直接に求められることになる。

さらに、ブラックホールが自転していないれば影は円形だが、ブラックホールが自転し

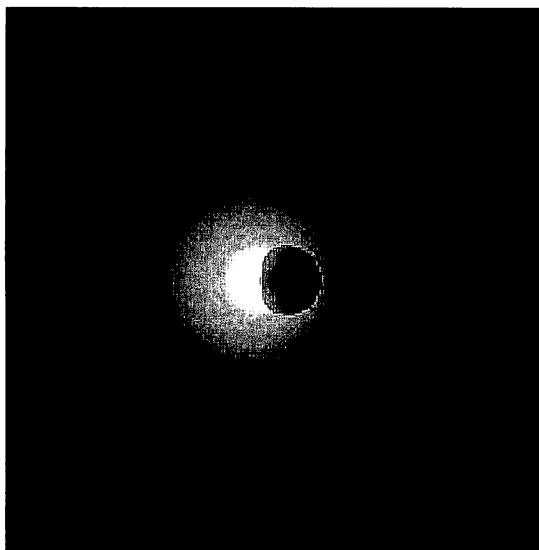


図 27 ブラックホールシャドウ (<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/hfalcke/paper/bhimage.abs.html>)。このシミュレーション例では、ブラックホールが自転している、影が歪んでいる。

ていると影の形状も歪む（図 27）。したがって、ブラックホールシャドウの形状まで測定できれば、ブラックホールの自転の程度までわかるのである。

ブラックホールシャドウの研究は、ファルケたちや日本の若手の高橋労太らの研究によって、詳しい理論的計算が進展している。一方で、観測的にも、銀河系中心いて座 A\* や巨大橢円銀河 M87 など、いくつかの超巨大ブラックホールでは、ブラックホールシャドウの観測が視程に入り始めた。10 年ぐらいのうちには、ブラックホールシャドウの観測によって、超巨大ブラックホールの重さが求められるようになるかも知れない。いまから楽しみである。

## 参考文献

- [1] Meria and Falcke 2001, Ann Rev A&Ap 39, 309
- [2] Ghez, A.M. et al. 2000, Nature 407, 349
- [3] Schodel, R. et al. 2002, Nature 419, 694
- [4] Young, P.J. et al. 1978, ApJ 221, 721
- [5] Sargent, W.L.W. et al. 1978, ApJ 221, 731
- [6] Tonry, J.L. 1984, ApJL 283, L27
- [7] Kormendy, J. 1988, ApJ 325, 128
- [8] Kormendy, J. and Richstone, D. 1995, Ann Rev A&Ap 27, 581
- [9] Kormendy, D. and Gebhardt, K. 2001, Relativistic Astrophysics: 20th Texas Symposium, p363
- [10] Ford, H.C. et al. 1994, ApJL 435, L27
- [11] Harms, R.J. et al. 1994, ApJL 435, L35
- [12] Miyoshi M. et al. 1995, Nature 373, 127
- [13] Kato, S., Fukue, J., Mineshige, S. 1998, Black-Hole Accretion Disks, Kyoto University Press, Kyoto
- [14] Haiman and Loeb, 2001, ApJ, 552, 459
- [15] Matsumoto H. et al. 2001, ApJL 547, L25
- [16] Malkan, M.A. 1983, ApJ 268, 582
- [17] Chen, K. and Halpern, J.P. 1989, ApJ 344, 115
- [18] Tanaka, Y. et al. 1995, Nature 375, 659
- [19] Blandford, R.D. and McKee, C.F. 1982, ApJ 255, 419
- [20] Magorrian, J. et al. 1998, AJ 115, 2285
- [21] Fukue, J. and Yokoyama, T. 1988, PASJ 40, 15
- [22] Falcke, H., Melia, F., Agol, E. 2000, ApJ 528, L13